

# 2016年熊本地震による熊本城石垣の変状の分析

神谷 圭祐<sup>1</sup>・菊本 統<sup>2</sup>・橋本 涼太<sup>3</sup>・桑島 流音<sup>4</sup>・小山 倫史<sup>4</sup>

## Damage analysis of stone walls of Kumamoto castle due to the 2016 Kumamoto earthquake

Keisuke KAMIYA<sup>1</sup>, Mamoru KIKUMOTO<sup>2</sup>, Ryota HASHIMOTO<sup>3</sup>,  
Ryuto KUWAJIMA<sup>4</sup> and Tomofumi KOYAMA<sup>4</sup>

### Abstract

Damage of stone walls of Kumamoto castle caused by the 2016 Kumamoto earthquake is investigated and the mechanisms of deformation, failure and collapse of the walls are discussed. 3-dimensional geometry of the walls were measured by 3D laser scanner and the deformation of the walls were analyzed by comparing with the previous measurement results before the earthquake and traditional shape of stone walls described in ancient documents. The profiles of the walls measured by 3D laser scanner clearly showed the unnatural shape of the stone walls. This unnatural shape of the stone walls can be observed even in the stone walls which was saved from the collapse. In the future, the evaluation of the safety/stability of the masonry walls is important for the restoration and 3D digital data obtained by 3D laser scanning technique will be useful.

キーワード：直下型地震，城郭石垣，変形・破壊，レーザー測量，複合構造物

Key words：epicentral earthquake, stone wall of castle, deformation and failure, laser measurement, stone-soil composite structure

### 1. はじめに

2016年4月14日21時26分，熊本県熊本地方を震央として震源の深さ11 km，気象庁マグニチュー

ド (Mj) 6.5の地震（前震）が発生し，図1 (a) のように熊本県益城町で震度7を観測した<sup>1)</sup>。28時間後の4月16日1時25分には，同地方を震央とし

<sup>1</sup> 横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府  
Department of Civil Engineering, Yokohama National University

<sup>2</sup> 横浜国立大学 都市イノベーション研究院  
Department of Civil Engineering, Yokohama National University

<sup>3</sup> 広島大学大学院 工学研究科  
Graduate School of Engineering, Hiroshima University

<sup>4</sup> 関西大学 社会安全学部  
Faculty of Societal Safety Sciences, Kansai University

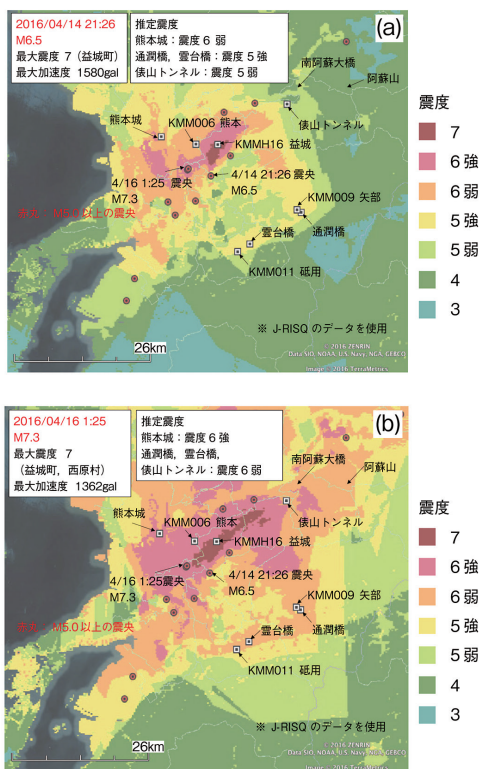


図1 2016年熊本地震による震度分布 (J-RISQ<sup>1)</sup> で公開された推定地震動をもとに作成)  
(a) 前震 (4月14日) (b) 本震 (4月16日)

て震源の深さ12 km, Mj 7.3の地震 (本震) が発生し, 図1 (b) に示すように熊本県西原村と益城町で震度7を観測した<sup>1)</sup>。構造物に大きな被害をもたらす地震動として, 図2に示すように最大加速度800 gal 以上かつ最大速度100 cm/s 以上という目安<sup>2,3)</sup>が示されているが, 本震時において震央に近いKMMH16益城ではこの目安を満たす地震動が計測され, 実際に人家や社会インフラに甚大な被害が発生した<sup>4)</sup>。

一方, 本震の震央から約7 km 北西に位置する熊本城では, 図1に示すように前震時に震度6弱, 本震時に震度6強の揺れを生じたものの, 前震と本震のいずれにおいても, 熊本城に最も近いKMM006熊本で観測された地震動は図2の大被害地震の目安よりも明確に小さく, 一般的な建物被害は西原村や益城町に比べると少なかった。しかし, 熊本城では多数の石垣が崩壊し<sup>5)</sup>, 平石部

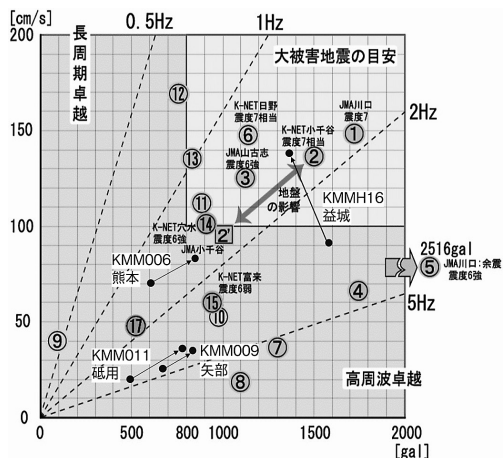


図2 2016年熊本地震と過去の主要な地震における最大速度と最大加速度の関係 (矢印の始点は4月14日の前震, 終点は4月16日の本震を表す), および大被害地震の目安 (青井<sup>3)</sup>に加筆)

が崩壊して角石だけであらうじて支持される櫓の様子は一しばしば報道でも取り上げられた。これは, 城郭石垣のように急勾配の石積みと背面地盤からなる複合構造物に対して, 一般的な構造物とは異なる耐震性の評価基準が必要であることを示唆している。その後, 崩壊した石垣の応急措置がとられ, 修復活動もはじまっているが, 崩壊に至らなかった石垣の幾つかでは, 目視でも確認できるほど明確に変状を生じた箇所があったものの, 変状程度の特定や補修要否の判断は必ずしも進んでいないのが実情である。

以上の状況を鑑みて, 本論文では, 残存する石垣の地震前後の形状を明らかにし, 地震による変状度合いを定量化するとともに, その力学的な安定性について議論する。そこでまず, 熊本城石垣の被害状況を概観し, 石垣の安定性評価を行う上で検討すべき項目を洗い出した。次に3次元レーザー測量による石垣形状の計測について説明した後, 計測結果を地震発生以前の計測結果や古文書に基づいて求めた伝統的な石垣形状<sup>6)</sup>と比較することで, 石垣の変状を定量化した。さらに石垣の高さや勾配といった幾何的特徴と変状の関係について分析し, 変状および崩壊のリスクが高い石垣の特徴について考察した。

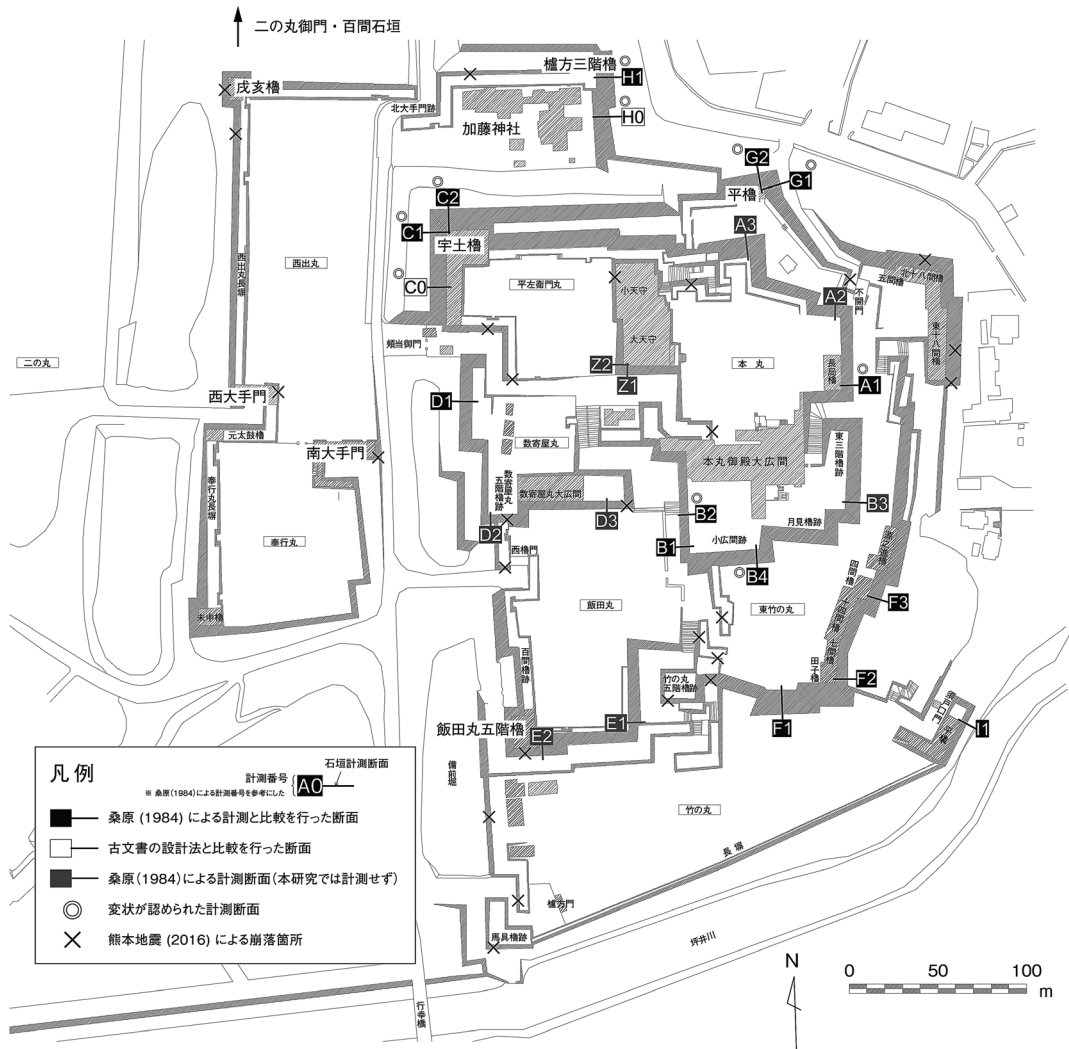


図3 熊本城郭石垣の被災状況および石垣形状の計測箇所(熊本城調査研究センターの図<sup>5)</sup>をもとに作成)

## 2. 熊本城石垣の被害

2016年熊本地震による熊本城石垣の被害の詳細は、熊本城調査研究センター<sup>7)</sup>や土木学会地震工学委員会<sup>8)</sup>、小山ら<sup>9)</sup>が報告している。ここでは、特徴的な変状や崩壊の事例について説明する。紹介する事例の場所は図3に記載した。なお、石材の落下がみられたものを崩壊、石材の落下はみられないものの石垣形状に有意な変化がみられたものを変状と定義する。

### 2.1 変状が確認された石垣

既報<sup>7)</sup>では、熊本城の石垣の全表面積約79,000 m<sup>2</sup>のうち、約23,600 m<sup>2</sup>の石垣で変状を生じたことが報告されている。

地震時に崩壊には至らなかったものの、変形が明瞭に確認されたり、部分的に石材が崩れたりした石垣の変状の一例として、宇土櫓石垣の被災状況を図4に示す。同石垣は熊本城では最も高い石垣(高さ約20.8 m)であり、北面の石垣では、(a)に示すように天端付近で明瞭なはらみ出しや崩壊



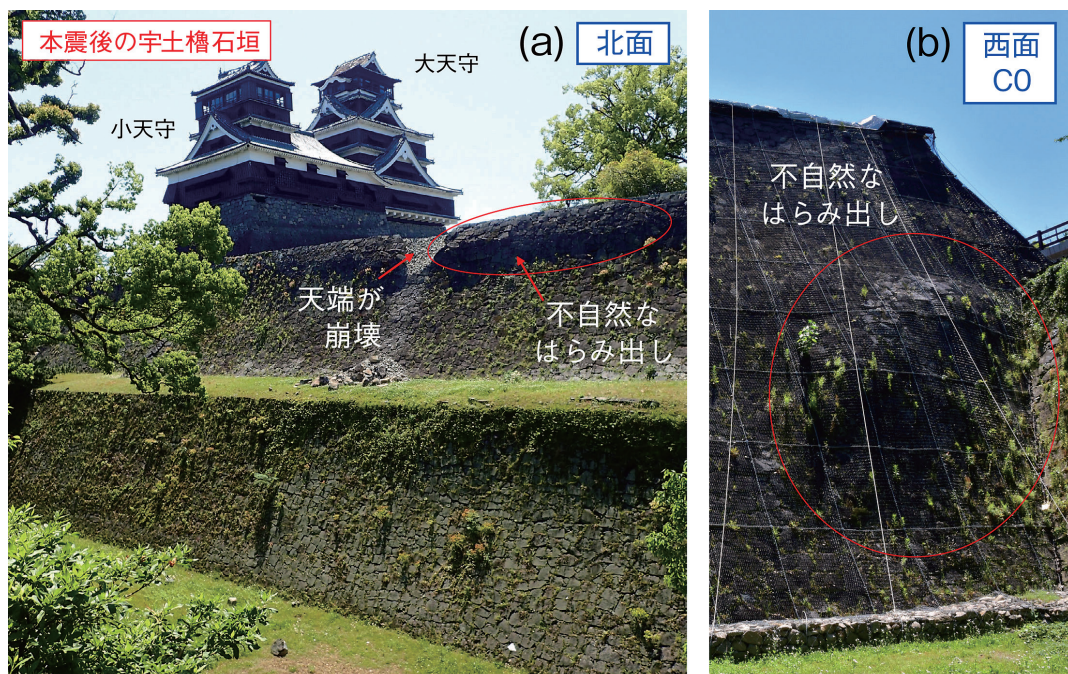


図4 宇土櫓石垣の被災状況

が確認された。また、宇土櫓西側の石垣では、(b)のように中央付近に明瞭なはらみ出しがみられ、崩落防止のネットが張られた。

図5は、櫓方三階櫓石垣の被災状況である。櫓方三階櫓の石垣は、城内で2番目に高い石垣(約20.0 m)であり、南面の石垣では(a)のように石垣上部で明瞭なはらみ出しが確認された。(a)に隣接する石垣を側方から撮影した(b)では、石垣上部に明瞭な目開きを生じている様子を確認できる。一方、低い石垣においても変状が多数発生しており、例えば加藤神社横の石垣は明瞭なはらみ出しや石材のずれが確認され、崩落防止ネットによる応急処置が行われた(図6)。

以上のような城郭石垣のはらみ出しや勾配の不自然な変化といった変状は法面の中央から天端付近の比較的、高い位置で多く確認された。このような変状によって、崩壊には至らないまでも、力学的安定性が損なわれている石垣が存在する可能性があるため、地震発生後速やかに変状の程度を明らかにして、補強・補修等の対策を決定することが重要である。変状の程度を定量化するために

は、地震前の計測データや古文書等に記された伝統的な石垣形状をもとに、地震後の石垣の形状と比較する必要がある。これに対して、3章では定量化の方法を議論した後、定量化した変状をもとに城郭石垣の地震時安定性について考察を行う。

## 2.2 大規模な崩壊を生じた石垣

多数の石材の崩落や背面地盤の破壊を生じた大規模な崩壊の一例として、図7に戌亥櫓石垣の被災状況を示す。戌亥櫓石垣は、(a)に示すように前震では櫓直下の石垣は崩壊を免れて、櫓の脇の石垣が崩壊した程度であったが、本震では(b)のように大規模に崩壊した。前震、本震と2度の大きな地震が襲い、かつ崩壊が進行したことから、複数回の危険事象を考慮した安定性の評価が不可欠である。

本震後の戌亥櫓直下の石垣は平石が顕著に崩壊し、かろうじて角石により支持されていることがわかる。なお、平石部が崩壊し、出隅が支持する形で石垣が残存した事例は、飯田丸五階櫓や西大手門、南大手門など櫓や城門の直下の石垣におい



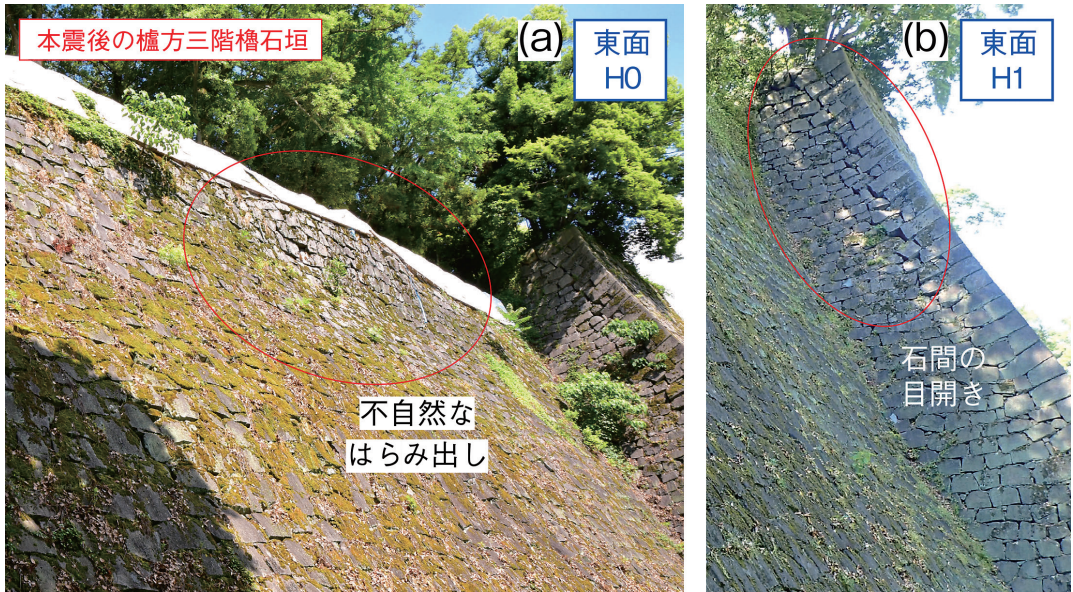


図5 櫓方三階櫓石垣の被災状況



図6 加藤神社横の石垣の被災状況

て確認された。熊本城石垣の出隅は直方体の角石の短辺と長辺を交互に積む算木積みと呼ばれる形式で構築されており、櫓の自重は出隅に沿う曲線の方に力を伝達する形で支持されていると考えられる。上部に構造物が存在する石垣が出隅で残存する事例が多くみられたのは、上部構造物の自重が出隅の角石に伝達されることで角石間の摩擦強度が比較的高い状態にあったためと考えることができよう。

次に、図8に百間石垣の被災状況を示す。百間石垣は4月14日の前震で一部が崩壊し、4月16日

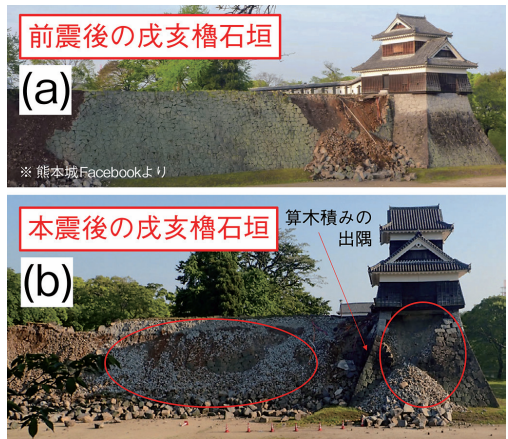


図7 戌亥櫓石垣の被災状況

の本震でさらに多数の箇所が崩壊し、(a)のような状況となった。この石垣でも(b)に示すように出隅は残存し、出隅の角石と隣接する平石の間には明確な目開きが確認された。よって、角石を隙間なく緻密に積んだ出隅と、間詰め石で隙間を埋めながら積んだ平石部では地震時の応答特性や安定性が異なるものと推察される。図9は図8(a)の①、②の背面地盤の本震後の様子であるが、



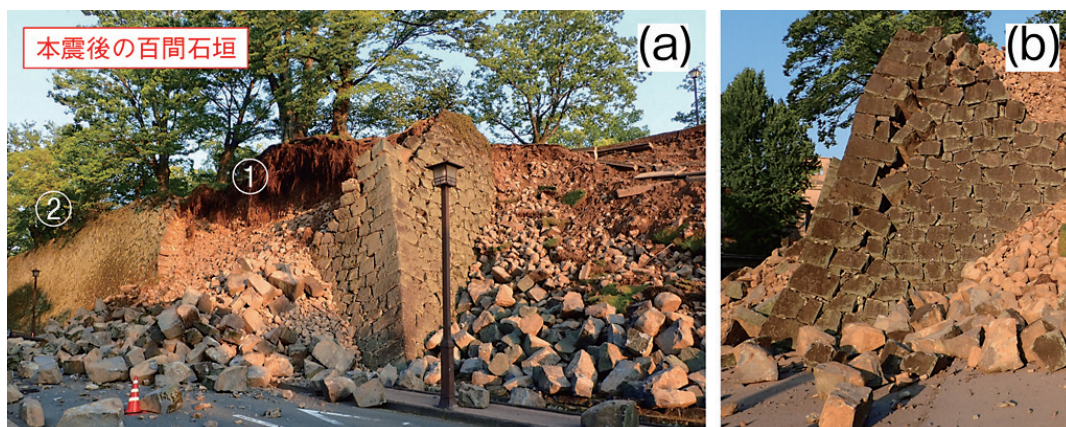


図8 百間石垣の被災状況



図9 百間石垣背面地盤の被災状況

地表に石垣と平行な亀裂が多数発生し、①部の背面では側溝と地盤に2～3 cmの隙間を生じて側溝のコンクリート蓋が落下した。このことから石垣の背面地盤は地震時に石垣側に変位していること、変位量は石垣崩壊箇所の背面地盤で顕著であること、石垣が崩壊した箇所の背面地盤は主働破壊していることが推察される。

図10は二の丸御門石垣の被災状況である。(a)のように同石垣は平石が大規模に崩れ落ちて、背

面の地盤も流出した。二の丸御門の崩壊法面を側方から撮影した(b)では、明瞭に2つの破壊形態を見てとることができる。すなわち、石材の剥離に伴う急勾配の破壊線と、石垣内部の地盤の主働破壊に対応する緩い角度(約44度)の破壊線である。このような複合的な破壊モードも含めて城郭石垣の耐震安定性を評価するには、剥離や転倒といった石材のみの応答を考慮するだけでは不十分であり、石材と地盤の力学的相互作用を適切に

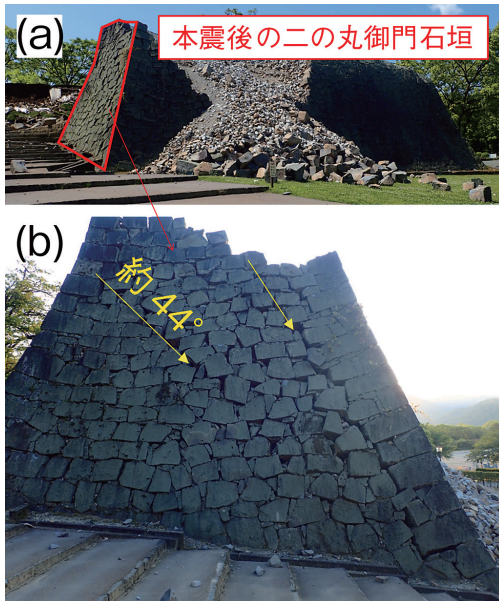


図10 二の丸御門石垣の被災状況

考慮することが必要である。

### 3. 熊本城石垣の変状の定量化と考察

地震による城郭石垣の変状は、地震前後の石垣形状を比較することにより特定できる。本章では、石垣形状の計測方法と地震による城郭石垣の変状の評価方法を説明し、熊本城石垣の変状について定量的な考察を加える。

#### 3.1 地震前の石垣形状

地震発生後に石垣の変状を明らかにするためには、地震発生前の石垣形状の情報が必要になる。しかし、地震発生前の石垣形状が必ずしも計測されているとは限らないので、既往文献・資料から可能な限り計測等の情報を収集するとともに、データが得られない場合には、石垣の伝統的あるいは理想的な形状曲線を健全時の石垣形状として用いた。ただし、森本ら<sup>10)</sup>も指摘しているように、古文書に記された設計法に基づいて再現した伝統的な石垣曲線が、実際に築造された石垣の曲線に完全に一致するとは限らないので、地震による変状の評価に用いる際には慎重な議論が必要で

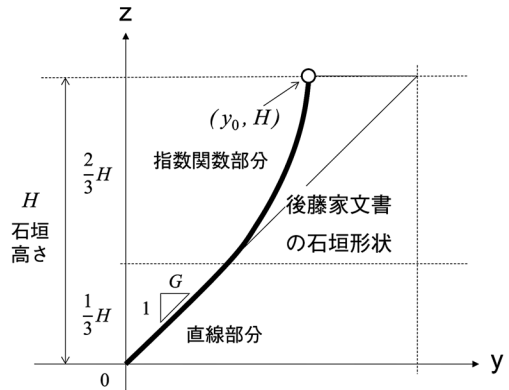


図11 「後藤家文書」による設計法

ある。

#### a) 地震発生前の石垣形状<sup>11)</sup>

ここでは桑原が1984年に23測線で得た石垣形状データのうち、図3に黒線で示す14測線を利用した。桑原は、プリズム反射鏡を取り付けたそりをロープにより下降させ、石垣前方より光波タキオメーターを用いてプリズム反射鏡までの斜距離と仰角を測定することで、石垣形状を得ている。使用した光波タキオメーターの分解能は1mmであった。

#### b) 伝統的・理想的な石垣形状

建設当時の伝統的な設計に基づいた理想の石垣形状は、城郭石垣の設計法を説明した古文書から求めることができる。桑原<sup>11)</sup>は後藤家文書に記された石垣形状をもとに熊本城の石垣曲線を求めている。これに対して、柳井<sup>12)</sup>は石垣曲線の定式化を試みており、西田ら<sup>6)</sup>は後藤家文書に記された石垣曲線の近似曲線を提案している。ここでは西田らの方法をもとに決定した。図11は後藤家文書の石垣形状を模式的に示しており、その算出手順は以下の通りである。

- ①法尻を原点  $(0, 0)$  とし、石垣内部に向かう方向に  $y$  座標、鉛直上向きに  $z$  座標をとる。石垣上端の座標  $(y_0, H)$  は実測に基づいて設定する。
- ②法尻から石垣高さ  $H$  の  $1/3$  までは、石垣形状



を勾配  $G$  (傾き  $1/G$ ) の直線で近似する。

$$y = Gz \quad \left( 0 \leq z \leq \frac{1}{3}H \right) \quad (1)$$

③石垣高さ  $H$  の  $1/3$  から天端までは  $z$  の二次関数として  $y$  を近似する。

$$y = Gz - (GH - y_0) \left( \frac{3z - H}{2H} \right)^2 \quad \left( \frac{1}{3}H < z \leq H \right) \quad (2)$$

### 3.2 地震後の石垣形状

地震後の石垣形状は3次元レーザースキャナにより計測した。3次元レーザースキャナは、方位と仰角を高速に変化させながらレーザー距離計により計測対象物までの距離を計測する機器で、計測器を原点として全方位の対象物の3次元座標を数値化できる。また、複数の位置から対象物を計測してデータ処理することで、対象構造物の3次元形状も得ることができる。本研究では、測定範囲  $0.6 \text{ m} \sim 130 \text{ m}$ 、範囲誤差  $\pm 2 \text{ mm}$ 、波長  $1550 \text{ nm}$  のレーザー距離計が搭載された計測器を用いた。本論文に示す結果には2017年5月の計測データを用いており、3.1で説明した方法により求めた地震前の石垣形状と比較した。

計測データは膨大な点群の3次元座標で構成される。座標軸は直交座標  $xyz$  系を設定しており、 $z$  軸は鉛直方向に一致し、 $x$  軸と  $y$  軸は水平面内に含まれる。点群データからの石垣形状の抽出の一例を図12に示す。具体的な手順は以下の通りで

ある。

- ①点群データから対象とする石垣の法筋に沿う直線 (a) の黒点線を抽出し、この直線が  $x$  軸と平行に一致するように、全点群の座標を  $z$  軸まわりに回転させた後、平行移動させる。
- ②①の操作により  $x$  軸に垂直な平面 ( $x = \text{const.}$ ) は、石垣法面の法線を含む鉛直断面になる。点群データは不規則に分布しているので、石垣形状を取得する断面の  $x$  座標の  $\pm 5 \text{ mm}$  の範囲に含まれる点群データを抽出する。
- ③抽出した点群データから  $y$  座標と  $z$  座標を用いて石垣形状をプロットする。

ここで、計測データから上述の操作で抽出した石垣形状の精度を検証する。同じ日に同じ石垣を異なる位置から計測した後、同一の断面を抽出し、石垣形状の一致性を確認した。計測位置は図13に示す3ヶ所である。各データはそれぞれ独自の座標系が設定されているため、前述のような座標変換を行った後、石垣高さが  $z = 10 \text{ m}$  になる図14の断面の  $x$  座標が原点になるように平行移動した。次に、3つのデータからそれぞれ  $x = 5 \text{ m}$  の鉛直断面で石垣形状を抽出し、鉛直軸方向に  $0.10 \text{ m}$  ごとに互いの距離の絶対値を求めた。なお、点群データは不規則に分布しており、同一鉛直座標に計測点が存在するとは限らないので、直近の点群データから線形補間した。図15に全点群について計測誤差ごとの度数を棒グラフ、計測誤差が小さい方からの累積度数の割合を折れ線で示す。図よ

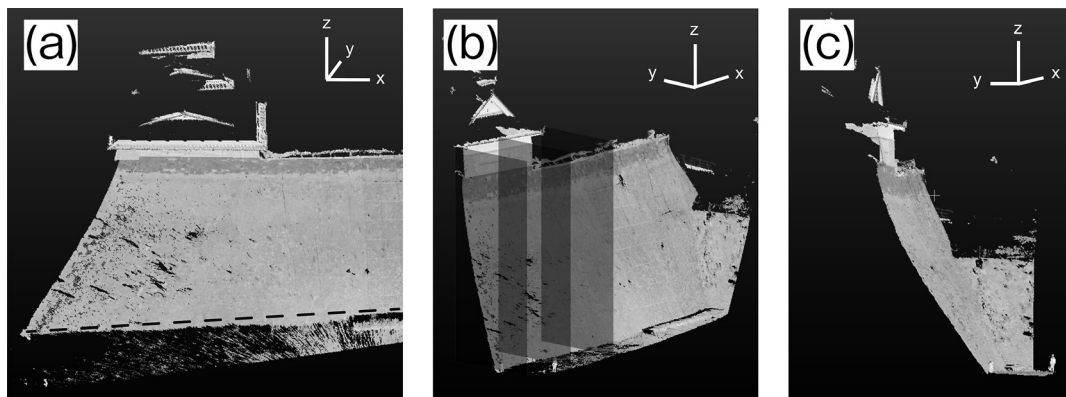


図12 石垣形状の抽出手法

り、全計測データの80%が5 cm 以内の誤差に収まることから、5 cm 以上の変状は有意であると判断できる。

### 3.3 地震による石垣の変状

3.1a) で説明した地震以前の石垣形状のうち14 測線<sup>11)</sup>について、3.2で説明した方法により同じ断面の地震後の石垣形状を求めた。それぞれの石垣の地震後の様子を図16, 石垣形状の比較を図17

に示す。14測線のうち、本丸東面 (A1), 月見櫓跡西面 (B2) および南面 (B4), 宇土櫓西面 (C1) および北面 (C2), 平櫓東面 (G1) および北面 (G2), 櫓方三階櫓東面 (H1) の8 測線では、石垣曲線に明確な変状が認められた。なお、数寄屋丸西面 (D1) の石垣下部は地震前後で石垣形状に差が見られるが、図16からもわかるように、石垣に草が繁茂し計測結果に影響を及ぼしている可能性があるため、変状の有無に関する考察からは除外した。

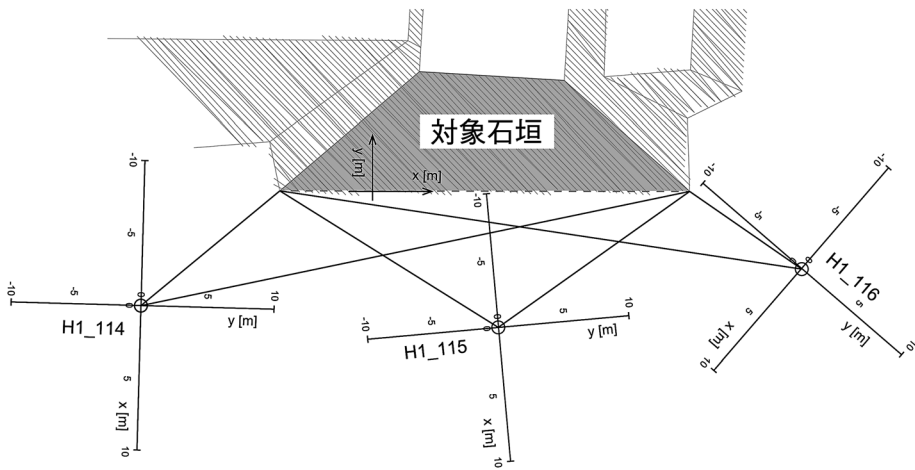


図13 石垣と計測位置の平面図 (櫓方三階櫓の石垣)

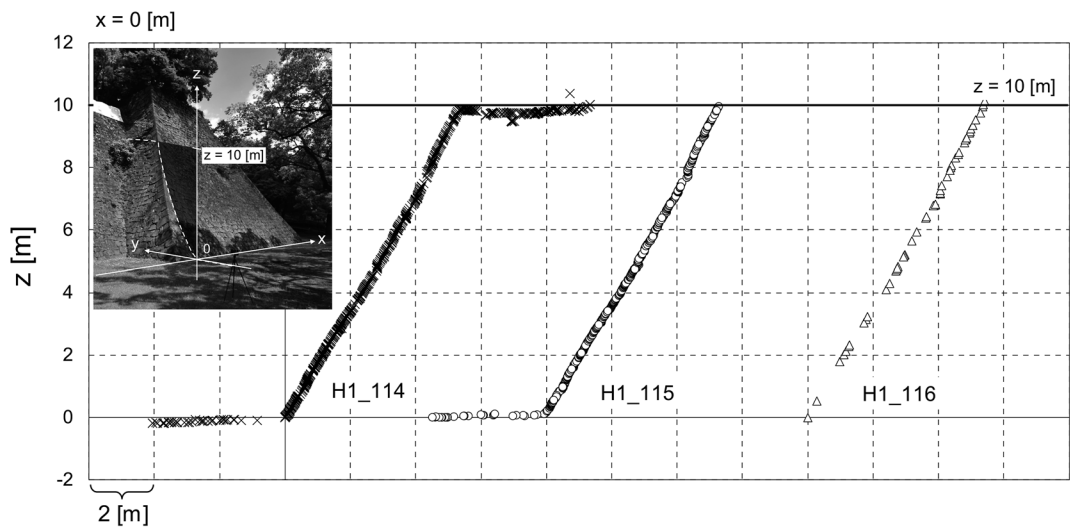


図14 x=0[m]における点群データごとの座標 (櫓方三階櫓の石垣)

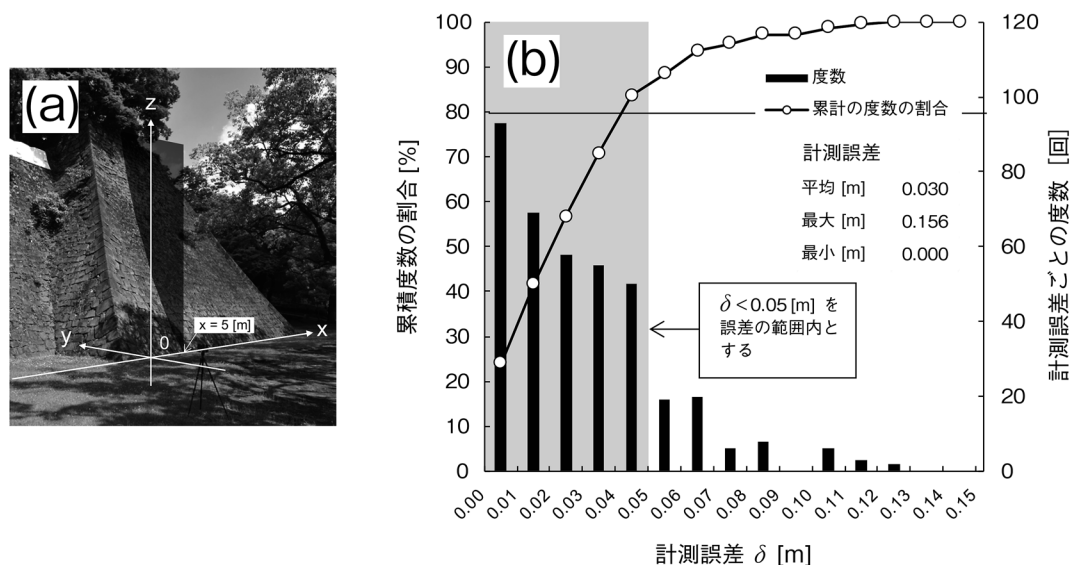


図15 x=5[m]における計測誤差 (櫓方三階櫓の石垣) (a) 計測位置, (b) 結果

目視観測で顕著な変形が確認された宇土櫓西面 (C1南側。以下, C0とする) および櫓方三階櫓東面 (H1南側。以下, H0とする) の石垣については, 3.2の手順で当該断面の地震後の石垣形状を求めるとともに, 3.1b) で説明した方法に基づいて古文書的设计法に基づく石垣の伝統的曲線を算出して比較を行った。石垣形状を比較した図17より, 地震後に明瞭なはらみ出しを生じた部分以外は, 概ね古文書的设计曲線に沿う形状であることがわかる。桑原は, 自身の計測と後藤家文書による設計曲線を比較し, 両者が概ね一致していることを確認している<sup>11)</sup>。これは, 地震前の比較においては, 伝統的石垣曲線が実際の石垣をよく再現することを示しており, 図17にみられる伝統的石垣曲線と乖離したはらみ出しは, 有意な変状と考えることができる。

次に, 地震による石垣の変状の特徴について, 図18に示す最大はらみ出し量  $\delta_{max}$  [m] とその位置  $z_b$  [m], および明瞭にはらみ出しを生じた変状範囲  $h_b$  [m] に着目して考察を行う。変状範囲は, 図15に基づき石垣断面の水平変位量が5 cm 以上確認された範囲とする。なお, はらみ出し量は水平方向の変位量であり, 石垣外向きを正とした。

また, 最大はらみ出し量は石垣断面の水平変位量の絶対値が最大であることを意味し, 負の値は石垣断面に凹みがみられたことを意味する。

#### a) 石垣の変状の特徴と安定性の判定指標

石垣の最大はらみ出し量  $\delta_{max}$  と石垣高さ  $H$  で規準化した最大はらみ出し位置  $z_b$  の関係を図19に示す。なお, 図19~24では, 最大はらみ出し量が正の石垣を白四角プロット (□), 負で凹の変状を生じた石垣を黒四角プロット (■) で示す。図より, 幾つかの石垣は中央付近で変状を発生しているものの, 大半は天端付近に変状を生じていることがわかる。特に, 天端付近に変状を生じた石垣では, 半数のケースにおいて凹みが確認された。通常, 天端付近の石材の凹みは背面の栗石の沈下に起因することが多く, その場合下方ではらみ出しが観察される<sup>13)</sup>。しかし, 今回凹みを生じていた石垣のうち, 櫓が建てられている C2, G1 では図17より顕著なはらみ出しは確認されていない。地震時に櫓が後方にずれ込み, 天端付近の石垣が沈下したことが石材の凹みがみられた理由の一つとして考えられる。

図20は, 変状範囲  $h_b$  と最大はらみ出し位置  $z_b$



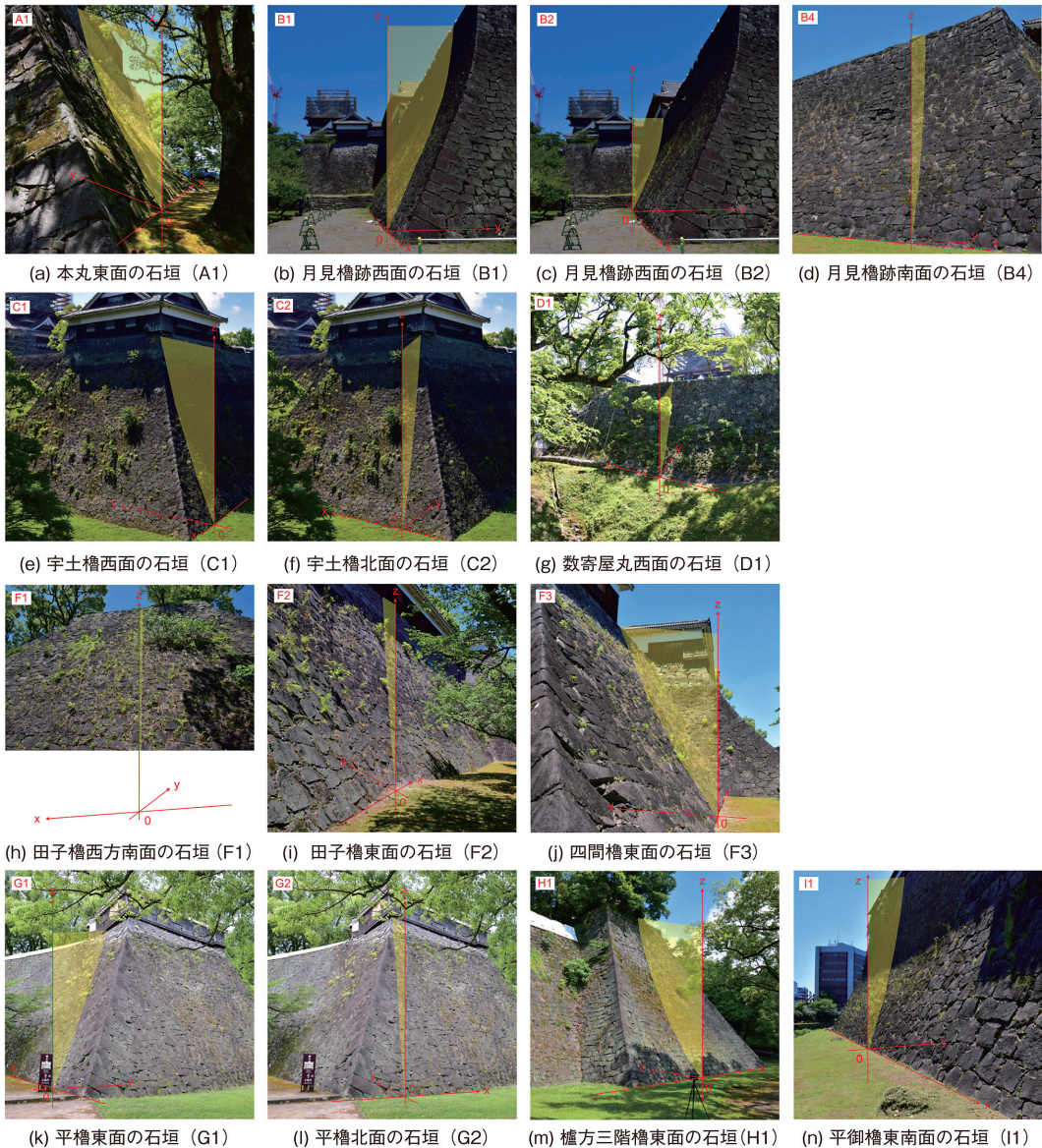


図16 地震後の熊本城石垣の様子と計測位置

の関係である。同図では縦軸、横軸ともに石垣高さ  $H$  で規準化した値を表示した。図より、天端付近に最大はらみ出し量が現れた石垣の変状は変状範囲  $h_b$  によって2つに大別できる。一つは、天端付近から広い範囲で変状を生じている①の石垣群で、石垣全体が傾斜して、転倒するモードの変状を生じている。特に、H1の石垣は側方から

石垣を観察した図4において明瞭な石材の目開きがみられたことから、石垣が背面地盤から分離して転倒するメカニズムで変状を生じていることが推察される。もう一つは、天端付近の狭い範囲にのみ変状を生じた②の石垣群で、天端付近の局所的な石材のずれや陥没の可能性が示唆される。

ところで天野<sup>14)</sup>は、変状範囲  $h_b$  [m] に対す

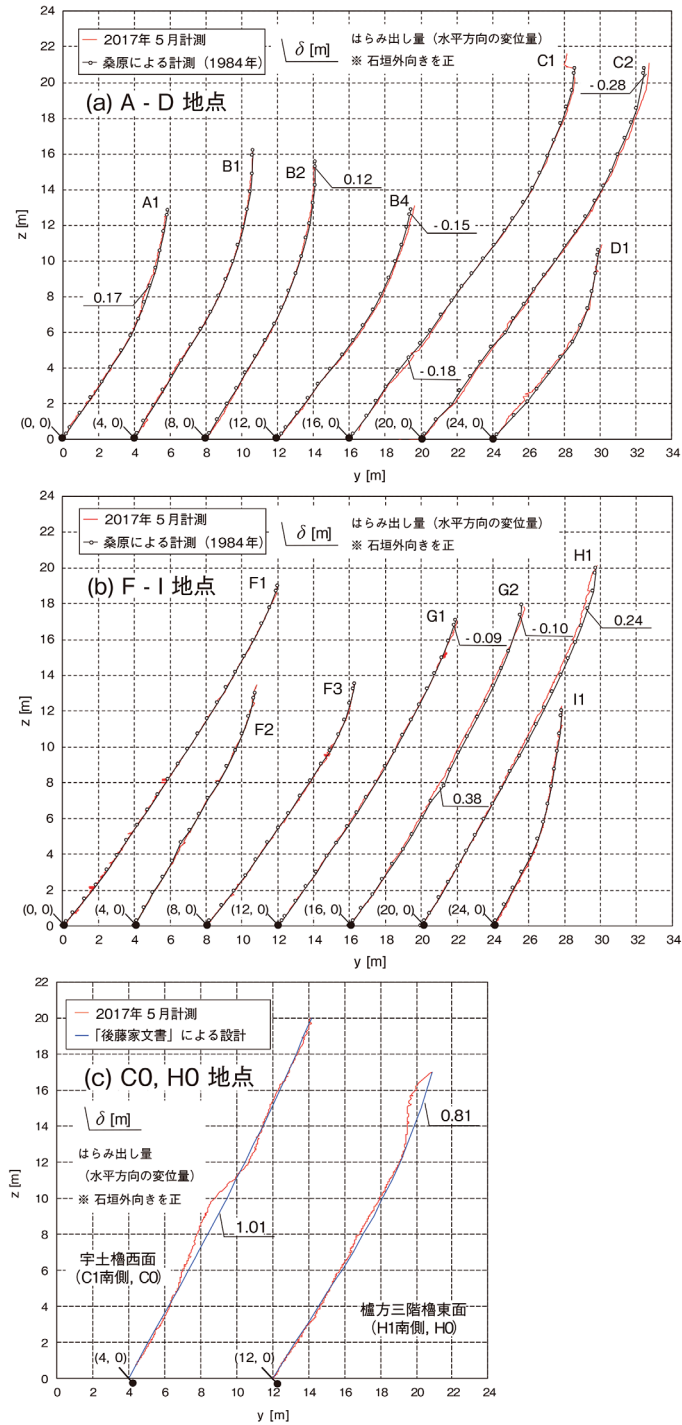


図17 地震前後の石垣形状の比較 (a) 桑原の計測との比較 (A-D 地点), (b) 桑原の計測との比較 (F-I 地点), (c) 古文書の設計との比較 (C0, H0地点)

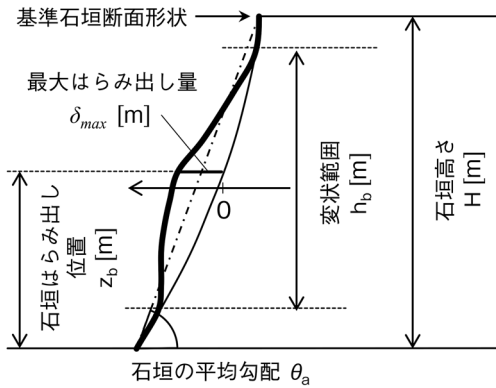


図18 石垣に関する諸量の定義

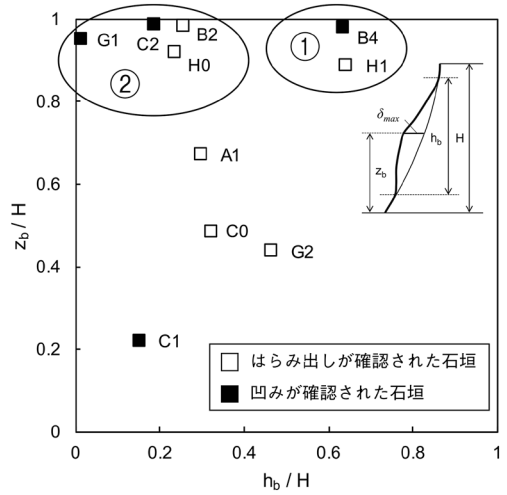


図20 石垣高さで規準化した変状範囲と最大はらみ出し位置の関係

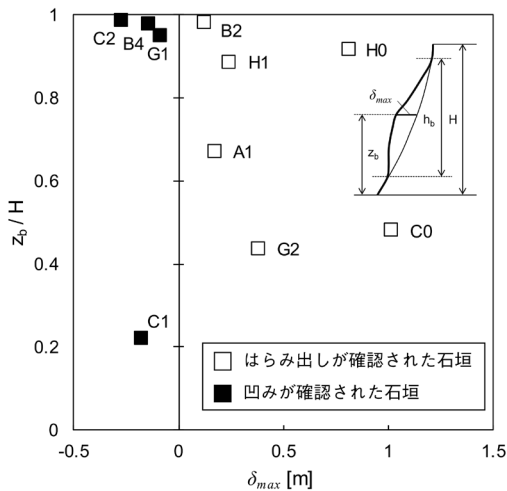


図19 最大はらみ出し量と石垣高さで規準化した最大はらみ出し位置の関係

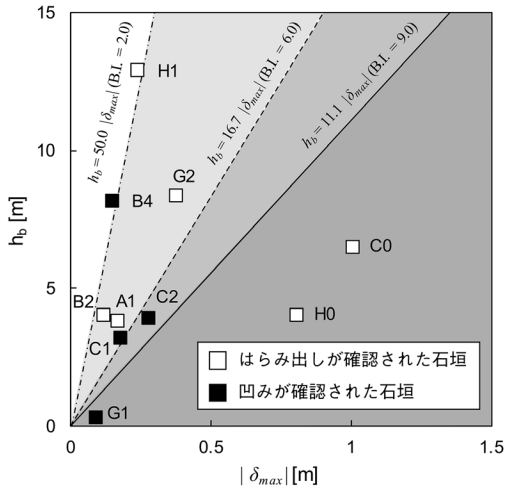


図21 最大はらみ出し量(絶対値)と変状範囲の関係

る最大はらみ出し量の絶対値  $|\delta_{max}|$  [cm] をはらみ出し指数 B.I. (Bulging Index) と定義し、B.I. が 6.0 前後になると石垣の崩壊事例がみられ、9.0 を超えるとはらみ出し量が過大になり石垣の自立性が損なわれると指摘した。また、野間ら<sup>15)</sup>は実物大の振動台実験と個別要素解析をもとに、B.I. が 2.0 を超えるとやや不安定、6.0 を超えると不安定かつ要対策という基準値を例示した。これに対して、図21に熊本城郭石垣の最大はらみ出し量の絶対値  $|\delta_{max}|$  と変状範囲  $h_b$  の関係を示す。同図では、原点を通る直線ではらみ出し指数 B.I. の等高線を

示した。図より、変状がみられた城郭石垣のほとんどは B.I. が 2.0~7.0 程度であり、 $|\delta_{max}| > 50$  cm かつ B.I.  $> 6.0$  であったのは古文書の石垣形状との比較で変状を評価した C0 と H0 のみであった。古文書との比較をもとにした石垣の変状は正確に評価することが難しく、また実際に崩壊した石垣の B.I. は図中に現れないことから、石垣の崩壊発生の目安は B.I. = 6.0 程度と考えることができよう。



b) 地震による被害を受けやすい石垣の特徴

城郭石垣の力学的安定性を特徴づける要因としては、石垣の高さや勾配といった幾何的特徴、石材の種類や加工程度（野面積み、打込み接ぎ、切込み接ぎ等）、積み方（布積み、乱積み等）、裏込めの種類や締固め度、基礎地盤の状態などが考えられる。1599年から1607年にかけて築城された<sup>16)</sup>熊本城の石垣は、年代によって築造方法が幾らか変遷しているものの、基本的には同じ種類の石材と裏込め材料を用いて同じ方法（打込み接ぎ）で加工した石材により築造されていることから、変状程度の比較および基礎地盤の状態を通して石垣の耐震性に及ぼす幾何特性（高さや勾配）の影響を議論することができる。熊本城石垣の崩落に対する基礎地盤の影響については橋本<sup>17)</sup>が議論しているが、本研究では幾何学的特性による変状程度の比較のみに着目した。なお、熊本城では地震前に多くの補修が行われている<sup>18)</sup>が、補修履歴による石垣の耐震性の違いについての検討は今後の課題としたい。

図22は、図10に記号を付した熊本城の27箇所の石垣について平均勾配と高さの関係を示している。図より、熊本城の石垣高さは最大で20 mを超え、50度弱～75度の平均勾配の範囲に含まれる。高さや勾配の関係では、17 m以下の石垣は

様々な勾配をもつものに対して、17 mを超える石垣は65度以下に勾配が抑えられており、高石垣は安定性の観点から所定の勾配以下で設計されていたと考えられる。

図22より、崩壊した3箇所の石垣は全て高さ15 m以下、平均勾配65度以上の急勾配の石垣であるため、低い石垣であっても急勾配の場合には耐震安定性が低く、優先的に耐震補強を行うことが望ましいといえる。また、高さが17 mを超える高石垣では崩壊事例はなかったことから、高石垣を65度以下の比較的低い勾配で築造した熊本城の設計は合理的であったといえる。ただし、高石垣の大半でははらみ出しや凹みが明瞭に確認されたことから、高石垣は変状を生じやすいことに留意する必要がある。

次に、石垣の高さや平均勾配と変状の程度の関係について考察する。図23は最大はらみ出し量と平均勾配の関係である。図中の破線は、桑原が示した25の熊本城の石垣断面の平均勾配の最大値と最小値を表す。図より、変状を生じた中でも平均勾配が60°前後の石垣は凹みを生じるものが多く、それより大きい勾配の石垣は正のはらみ出しを生じることがわかる。図24は、最大はらみ出し量と高さの関係を示しているが、高石垣であるほどはらみ出しや凹みの程度は顕著であるといえる。

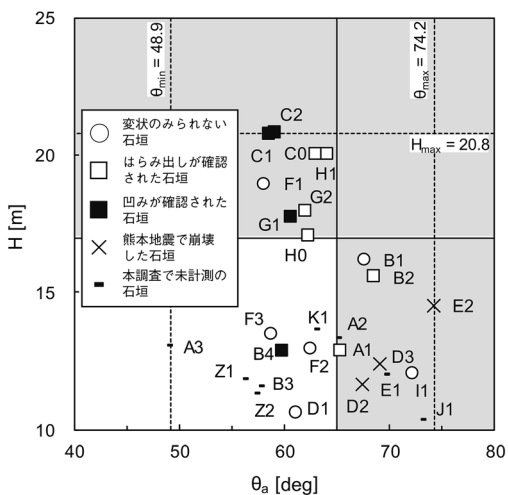


図22 石垣の平均勾配と高さの関係(桑原<sup>11)</sup>のデータを図化)

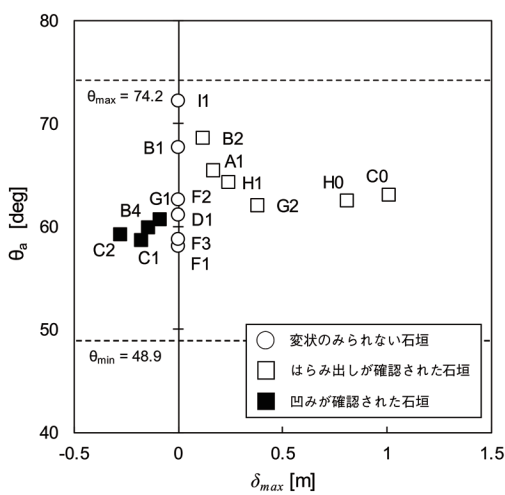


図23 最大はらみ出し量と平均勾配の関係

#### 4. まとめ

本論文では、2016年熊本地震による熊本城の残存する石垣について地震前後の形状を求め、地震による変状度合いを定量化するとともに、その力学的な安定性について議論した。石垣の変状は、最大はらみ出し量とはらみ出し位置、変状範囲の3つのパラメーターにより定量化した。

石垣の力学的な安定性について、既往研究を参考にはらみ出し指数 B.I. に基づいて評価したところ、熊本城の石垣の崩壊発生の目安は B.I.=6.0程度であることがわかった。これは、野間ら<sup>14)</sup>が示した基準値と概ね整合する結果といえる。

石垣の幾何特性に注目すると、高石垣の多くではらみ出しや凹みが明瞭に確認されたことから、高石垣は地震時に変状を生じやすいことが示唆された。また、高さ15 m以下であっても、平均勾配65度以上の急勾配の石垣にて崩壊事例がみられた。したがって、城郭石垣の維持管理の観点では、高石垣や急勾配の石垣形状を優先して計測しておくとともに、必要に応じて地震対策を施しておくことが肝要であるといえる。ただし、はらみ出しの量と石垣の崩壊リスクとの関係性は必ずしも明らかにできていないため、更なる検討が必要になる。また、2章で説明した石積みと背面地盤の力学的相互作用については、今後、モデル実験や

数値シミュレーションにより検討を進める予定である。

最後に、地震による城郭石垣の変状の定量化には、地震前の石垣形状の調査が必須である。熊本城の主要石垣について、詳細な数値データ付きで計測結果を公表された桑原先生に敬意を表するとともに、国内の他の城郭石垣についても地震等による変状発生時に備えて、石垣形状の計測を実施するとともに、利用しやすい形で数値データが保存・公開されることを期待する。

#### 参考文献

- 1) 防災科学技術研究所：J-RISQ 地震速報, <http://www.j-risq.bosai.go.jp/report> (2018-03-27アクセス).
- 2) 川瀬 博：震源近傍強震動の地下構造による増幅プロセスと構造物破壊能－1995年兵庫県南部地震での震災帯の成因に学ぶ－, 第10回日本地震工学シンポジウムパネルディスカッション資料集, 29-34, 1998.
- 3) 青井 真：(最大) 加速度・(最大) 速度・計測震度について, <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/chuetsuoki20070716/pgav5v20070716.html> (2018-03-27アクセス).
- 4) 気象庁：災害時自然現象報告書2016年第1号, [http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji\\_2016/saigaiji\\_201601.pdf](http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_2016/saigaiji_201601.pdf) (2018-03-27アクセス).
- 5) 熊本城調査研究センター：熊本城被災箇所図, [https://www.city.kumamoto.jp/common/UploadFileDsp.aspx?c\\_id=5&id=5566&sub\\_id=11&flid=95502](https://www.city.kumamoto.jp/common/UploadFileDsp.aspx?c_id=5&id=5566&sub_id=11&flid=95502) (2018-06-19アクセス).
- 6) 西田一彦・玉野富雄・西形達明・森本浩行：城郭石垣断面形状の設計および構築に関する考察, 土木史研究 21, 317-324, 2001.
- 7) 熊本城調査研究センター：地震後の石垣構造評価フローについて, [https://www.city.kumamoto.jp/common/UploadFileDsp.aspx?c\\_id=5&id=5566&sub\\_id=32&flid=122331](https://www.city.kumamoto.jp/common/UploadFileDsp.aspx?c_id=5&id=5566&sub_id=32&flid=122331) (2018-03-27アクセス).
- 8) 橋本隆雄：歴史的建造物の被害, 土木学会地震工学委員会, [http://committees.jsce.or.jp/eec2/system/files/12\\_%E6%A9%8B%E6%9C%AC\\_2\\_%E3%82%A2%E3%83%83%E3%83%97.pdf](http://committees.jsce.or.jp/eec2/system/files/12_%E6%A9%8B%E6%9C%AC_2_%E3%82%A2%E3%83%83%E3%83%97.pdf) (2018-03-27アクセス).

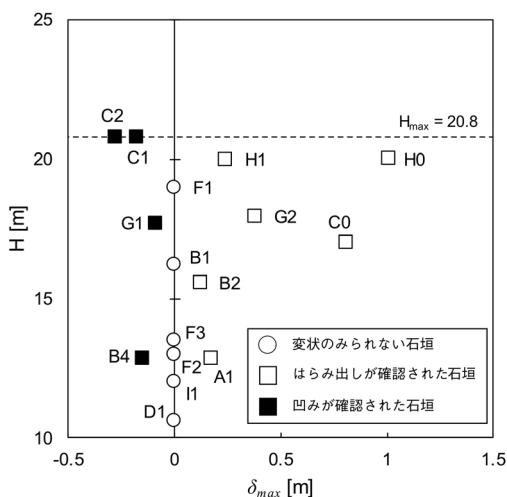


図24 最大はらみ出し量と高さの関係

- 9) 小山倫史・菊本 統・橋本涼太・桑島流音：平成28年(2016年)熊本地震における石積構造物の被害の調査と分析：熊本城の城郭石垣，第14回岩の力学国内シンポジウム，神戸市，2017.
- 10) 森本浩行・西形達明・西田一彦・玉野富雄：城郭石垣の断面形状と石垣構築技術の変遷に関する考察，土木学会論文集(806)，45-54，2005.
- 11) 桑原文夫：熊本城の石垣勾配，日本工業大学研究報告，第14巻，第2号，59-74，1984.
- 12) 柳井 浩：石垣の曲線について，オペレーションリサーチ 33(6)，281-286，1988.
- 13) 山本浩之・西形達明・八尾眞太郎・西田一彦・笠 博義：実物大モデルを用いた城郭石垣の地震時挙動の検討，土木学会論文集 C 66(1)，43-57，2010.
- 14) 天野光三・西田一彦・渡辺 武・玉野富雄・中村博司：徳川期大坂城城郭石垣構造の土木史的研究，土木学会論文集(660)，101-110，2000.
- 15) 野間康隆・山本浩之・西村 毅・笠 博義・西形達明・西田一彦：城郭石垣の地震時変形予測と安定性評価に関する研究，土木学会論文集 C(地圏工学) 69(4)，444-456，2013.
- 16) 熊本城調査研究センター：特別史跡熊本城跡総括報告書 整備事業編 第1章，[https://www.city.kumamoto.jp/common/UploadFileDsp.aspx?c\\_id=5&id=5566&sub\\_id=37&flid=129190](https://www.city.kumamoto.jp/common/UploadFileDsp.aspx?c_id=5&id=5566&sub_id=37&flid=129190) (2018-06-06アクセス).
- 17) 橋本隆雄・齊藤 猛：電気探査及び表面波探査による熊本城石垣等の地盤調査，第52回地盤工学研究発表会，名古屋市，講演集(CD-ROM)，2017.
- 18) 熊本城調査研究センター：これまでの石垣修理・重要文化財修理・熊本城復元整備計画の経緯と復元事業の経過，[https://www.city.kumamoto.jp/common/UploadFileDsp.aspx?c\\_id=5&id=5566&sub\\_id=4&flid=56925](https://www.city.kumamoto.jp/common/UploadFileDsp.aspx?c_id=5&id=5566&sub_id=4&flid=56925) (2018-06-06アクセス).
- (投稿受理：平成30年3月31日  
訂正稿受理：平成30年7月4日)

## 要 旨

本論文では，2016年熊本地震による熊本城の石垣の被害を計測・分析し，石垣の変状および崩壊のメカニズムについて議論した。3次元レーザースキャナで計測した地震後の石垣の3次元形状と，地震発生以前の計測結果や古文書に基づいて求めた伝統的な石垣形状を比較することで，石垣のはらみ出しを明瞭に捉えることができた。一連の検討結果からは，地震等の災害発生後に石垣の安定性を適切に評価し補強・補修対策を施すために，平時からレーザースキャナ等により石垣形状のデジタルデータを取得しておくことが重要であると示唆された。